

Д. А. Комкова\*, О. В. Антонова, А. Ю. Волков  
Институт физики металлов УрО РАН,  
г. Екатеринбург  
\*e-mail: tx-f@mail.ru

## МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИЯ ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Изучены микроструктура и механические свойства 1 мм лент магния, полученных в результате интенсивной пластической деформации при комнатной температуре при разном приложении нагрузки к оси столбчатой структуры исходного литого состояния. Показано, что выбранные схемы приложения нагрузки обеспечивают большие степени деформации за счет измельчения исходной структуры в результате непрерывно действующих процессов динамической рекристаллизации и формирования субструктуры в новых зернах.

*Ключевые слова:* магний, интенсивная пластическая деформация, микроструктура, механические свойства.

The magnesium ribbons (~1 mm) were obtained using the severe plastic deformation. Microstructure and mechanical properties of magnesium ribbons was investigated. The selected ways of load application are shown to provide a high degree of deformation due to the crushing of the original structure as a result of continuous dynamic recrystallization and the formation of substructure in new grains.

*Keywords:* magnesium, plastic deformation, microstructure, mechanical properties.

Магний и его сплавы принадлежат к наиболее легким металлическим конструкционным материалам. Интерес к ним как к материалам следующего поколения неуклонно растет благодаря их уникальным свойствам. Однако на сегодняшний день применение магния и магниевых сплавов ограничено из-за плохой обрабатываемости при комнатной температуре [1]. Это связано с тем, что при комнатной и более низких температурах деформация осуществляется главным образом по плоскостям базиса и лишь с повышением температуры активизируются дополнительные плоскости скольжения пирамиды и призмы [2].

Одной из возможностей улучшения обрабатываемости магния является создание мелкозернистой или ультрамелкозернистой структуры в материале за счет методов интенсивной пластической деформации (ИПД), что позволяет существенно улучшить его механические свойства.

Целью данной работы является изучение структуры и механических свойств литого магния после интенсивной пластической деформации при комнатной температуре за одну операцию методом поперечного выдавливания в специально разработанной оснастке.

В качестве исходного материала использовался технически чистый литой магний (99,98 %) со столбчатой структурой. Средняя высота зерна  $h_{ср}$  составила 7,7 мм, ширина  $d_{ср}$  равна 2,4 мм, средняя вытянутость зерен 3,2.

Из центральной части слитка вырезались три цилиндрических образца диаметром 30 мм и высотой 50 мм. Образец 1 был вырезан вдоль вытянутой оси зерна, образец 2 был вырезан перпендикулярно первому и образец 3 – под углом в  $45^\circ$  относительно первого образца. Эти заготовки подверглись интенсивной пластической деформации за одну операцию методом поперечного выдавливания в специально разработанной оснастке при комнатной температуре. В случае образца 1 осевая нагрузка прикладывалась параллельно направлению столбчатой структуры, для образца 2 плоскость приложения нагрузки была перпендикулярна к плоскости первого образца и в образце 3 – под углом в  $45^\circ$  к первым двум.

В результате были получены достаточно протяженные пластины шириной 30 мм и толщиной 1 мм без видимых следов трещин в образцах, за исключением небольшого растрескивания по краям пластины. Степень деформации составила  $\epsilon \sim 5$ .

Для структурных исследований использовались методы рентгеноструктурного анализа (дифрактометр RIGAKU в монокроматическом  $\text{Cu K}\alpha$  излучении) и просвечивающей электронной микроскопии (JEM200Сх). Механические свойства оценивались по измерению микротвердости на приборе ПМТ-3 с алмазной пирамидкой, а также путем испытаний на растяжения со скоростью 0,2 мм/мин (относительная скорость растяжения  $0,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) при комнатной температуре на машине INSTRON.

Анализ дифрактограмм образцов 1, 2 и 3 в исходном показал, что ориентировка зерен в плоскости приложения нагрузки существенно различается для всех трех образцов. В 1-м образце наблюдается очень интенсивный пик (002) на фоне слабых линий  $\{hkl\}$ , что свидетельствует о наличии в данном образце текстуры базиса. В образце 2 наблюдается практически весь набор возможных ориентировок ГПУ-кристаллов. На рентгеновском спектре 3-го образца выделяется сильный пик  $\{101\}$ , что указывает на преимущественное наличие зерен с такими ориентировками.

После деформации наблюдается изменение и перераспределение интенсивностей отражений. Общим для всех трех образцов является то, что дифрактограммы с плоскости пластин имеют очень сильную линию (002).

ПЭМ исследование магниевых лент после ИПД обнаружило, что произошло значительное измельчение исходной структуры, при этом морфология ее очень неоднородна. Наиболее типичными являются области новых рекристаллизованных зерен, которые соседствуют с участками

сильно фрагментированной субструктуры. Можно отметить разницу в размерах образовавшихся кристаллитов. Так, в пластине, сформированной из образца 1, разброс размеров новых зерен составляет  $0,5\div 10$  мкм. В двух других образцах он не превышает 4–5 мкм. Примеры микроструктуры образцов 1, 2 и 3 приведены на рис. 1.

Оценка механических свойств проводилась по результатам измерения микротвердости и испытаний на растяжение.

Микротвердость всех образцов колеблется в пределах 300 МПа, что соответствует известным литературным данным [2]. Колебания в значениях могут быть объяснены формированием различной микроструктуры в образцах. В образцах 2 и 3 размер зерен меньше, чем в образце 1, что сказывается на результатах измерений. Однако метод измерения микротвердости достаточно локален, погрешность в результатах измерений (4 %).

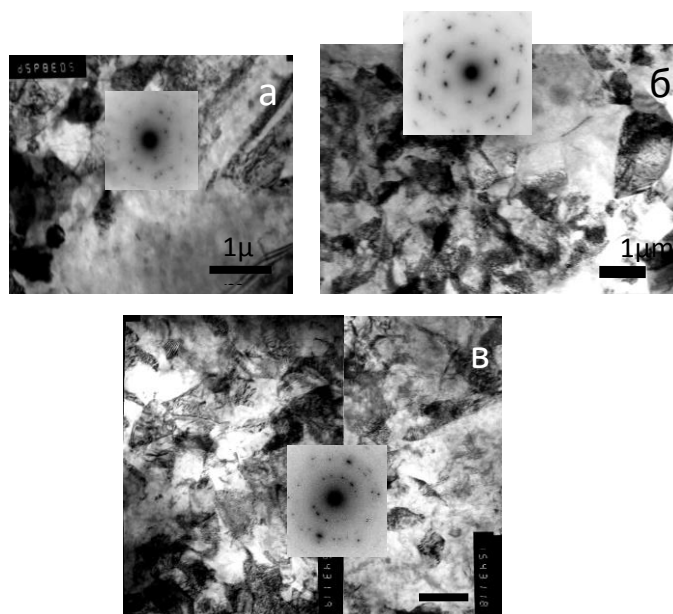


Рис. 1. Микроструктура магния после ИПД:  
а – образец 1, б – образец 2, в – образец 3

В таблице 1 приведены результаты механических испытаний на растяжение образцов, вырезанных из полученных 1 мм пластин. Видно, что механические свойства пластин зависят от того, из какого исходного образца они были получены. Особенно сильно повысилась пластичность образца 3. Образец 1 продемонстрировал наименьшее удлинение.

Таблица 1

## Результаты испытаний на растяжение

Образец	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
1	132	161	6,5
2	123	148	10
3	100	136	14

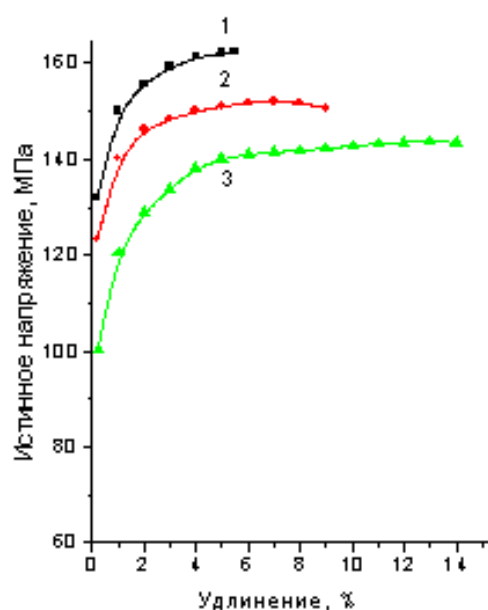


Рис. 2. Кривые растяжения для образцов 1, 2 и 3

Однако для 1-го отмечаются наиболее высокие значения пределов текучести и прочности. Высокие механические свойства магниевых пластин, вероятнее всего, связаны со значительным измельчением зерна в результате ИПД и формирования базисной текстуры, что благоприятно сказывается на дальнейшей деформации прокаткой.

## Выводы

1. Разработанная схема ИПД позволяет получить магниевые ленты толщиной 1 мм за одну операцию методом поперечного выдавливания при комнатной температуре.

2. Усилия, прилагаемые в процессе ИПД магния, зависят от степени текстурированности образца: чем больше выражена текстура базиса, тем больше усилия требуются для осуществления деформации.

3. Деформационная обрабатываемость магния с помощью ИПД связана с существенным измельчением исходной литой структуры за счет фрагментации исходных зерен и непрерывно действующих процессов динамической рекристаллизации, а также формированием благоприятной текстуры.

### Список литературы

1. *Mordike B. L.* Magnesium properties – applications – potential / B. L. Mordike, T. Ebert // J. Mater Science and Engineering A. 2001. № 302 (1). С. 37–45.
2. *Рейнор Г. В.* Металловедение магния и его сплавов / G. V. Raynor // The physical metallurgy of Magnesium and its Alloys. Pergamon Press. London – NewYork, 1959.